

## 고성능 슛크리트 라이닝의 설계 및 시공기술 분석

배규진<sup>1)</sup>, 장수호<sup>2)\*</sup>, 이석원<sup>3)</sup>, 박해균<sup>4)</sup>, 이명섭<sup>5)</sup>, 김재권<sup>6)</sup>

### Recent Issues in the Design and Construction of High-Performance Shotcrete Lining

Gyu-Jin Bae, Soo-Ho Chang, Seok-Won Lee, Hae-Geun Park,  
Myeong-Sub Lee and Jae-Kwon Kim

**Abstract** The development of high-performance shotcrete lining is essential in improving the long-term durability of tunnels and in introducing single-shell tunnelling methods, where shotcrete as well as rockbolts are used as permanent support members. In this paper, new and advanced admixtures to improve shotcrete performance are introduced. In addition, requirements for mechanical properties as well as test items for quality control of shotcrete are summarized. A case study on the application of the pneumatic pin penetration test which can estimate compressive strength of shotcrete more easily and quickly is also illustrated. Previous studies to analyze the behaviors of shotcrete lining by considering its transient hardening and to carry out the sensitivity analysis of the design parameters of shotcrete lining are discussed to give fundamental concepts on rock-support interactions. Representative single-shell tunnelling methods where high-performance shotcrete lining is applied as a permanent support are also introduced.

**KeyWords** Shotcrete, High-Performance, Admixture, Rock-support interaction, Single-shell tunnel

**초 록** 슛크리트와 록볼트를 영구 지보재로 사용하는 싱글셸 터널공법을 도입하고 터널의 장기 내구성을 향상시키기 위해서는 고성능 슛크리트의 개발이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 슛크리트의 고성능화를 위한 최신 슛크리트 혼화재료를 소개하였고, 국외에서 적용되고 있는 슛크리트의 제반 설계기준과 품질관리 시험방법들을 정리하였다. 특히 현장에서 슛크리트의 압축강도를 쉽고 빠르게 추정할 수 있는 공기압식 pin 관입시험의 적용 사례를 소개하였다. 또한 슛크리트 라이닝과 지반의 상호작용을 보다 정확하게 평가할 수 있도록 슛크리트 라이닝의 시간의존적인 경화특성을 고려한 이론적 해석과 슛크리트 라이닝의 설계변수들에 대한 민감도 분석 결과를 고찰하였다. 마지막으로 고성능 슛크리트 라이닝을 영구지보재로 사용하는 대표적인 싱글셸 터널공법들에 대한 사례들을 제시하였다.

**핵심어** 슛크리트, 고성능, 혼화재료, 암반-지보 상호작용, 싱글셸 터널

## 1. 서 론

스�크리트와 록볼트를 주지보재로 사용하여 지반의 이완을 억제함으로써 원지반의 지보능력을 최대한 활용하는 NATM (New Austrian Tunnelling Method) 개념이 본격적으로 1980년대부터 지하철 현장에 도입된

후로 슛크리트가 널리 적용되고 있다. 초창기 국내의 슛크리트 타설은 건식공법이 주로 사용되었으나, 슛크리트 작업환경의 개선 및 품질관리 등의 이유로 현재는 습식공법이 주로 사용되고 있다. 이러한 NATM 개념의 터널공사에서는 슛크리트와 같은 터널 지보재 이외에 2차 콘크리트 라이닝을 타설하고 있다. 콘크리트 라이닝의 적용 초기에는 구조적 역할이 아닌 시설공간 확보 및 미관확보에 주안점을 두었으나, 최근에 들어서 2차 라이닝은 장기적인 지반이완, 배수시설의 장기적인 기능저하에 따른 잔류수압 등 장기적으로 나타나는 불확실한 요소에 대한 안전율을 증가시키도록 설계·시공되고 있다. 그러나 현재까지 이러한 콘크리트 라이닝의 설치에 따른 정확한 목적 및 타당성이 확립되어 있지 않으며, 현장타설시 공기지연, 품질관리의

<sup>1)</sup> 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구부장/연구위원

<sup>2)</sup> 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원

<sup>3)</sup> 정희원, 건국대학교 사회환경시스템공학부 조교수

<sup>4)</sup> 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 과장

<sup>5)</sup> 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 부장

<sup>6)</sup> 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀장/상무

\*교신저자(Corresponding Author): sooho@kict.re.kr

접수일: 2004년 2월 27일

심사 완료일: 2004년 3월 2일

문제점, 균열발생 등의 문제점을 노출시키고 있다. 또한 장기적인 터널 유지관리면에서 슛크리트 면을 감싸고 있어 터널 안전진단 및 유지보수에 지장을 초래하는 문제를 발생시키고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 최근에 국내·외에서는 콘크리트 라이닝을 타설하지 않고 슛크리트와 록볼트를 영구지보재로 적용하는 싱글셸(single-shell) 터널공법에 대한 연구가 진행되고 있다.

이러한 터널공법을 국내에 도입하고 터널의 장기내구성을 향상시키기 위해서는 록볼트와 더불어 고성능 슛크리트의 개발이 필수적이다. 그러나 이러한 관점에서 현재 국내에서 시공되고 있는 슛크리트의 강도나 내구성은 주지보재로서 활용하기에는 매우 낮아 슛크리트의 재료 및 배합기법에 대한 전반적인 연구가 필요한 실정이다. 또한 터널의 설계·해석시에 지반과 슛크리트 라이닝의 상호작용을 정확하게 고려하지 못하고 있다.

따라서 본 고에서는 슛크리트의 고성능화를 위한 급결제, 혼화재 및 보강재 등의 슛크리트 신재료와 국내·외 관련연구 동향을 소개하고자 한다. 또한 선진 외국에서 적용하고 있는 슛크리트의 제반 설계기준과 품질관리 시험방법들을 정리하였다. 특히 공기압식 pin 관입시험과 같이 현장에서 쉽고 빠르게 적용할 수 있는 새로운품질관리 시험방법들을 소개하였다. 슛크리트 라이닝의 설계·해석 측면에서는 슛크리트의 시간의존적 경화특성을 고려한 이론적 해석방법을 소개하고, 슛크리트 라이닝과 지반의 상호작용 측면에서 주된 영향을 미치는 슛크리트의 설계인자들을 평가하기 위한 민감도 분석 결과들을 정리하였다. 이와 함께 지반과 슛크리트 라이닝 사이의 인터페이스(interface) 특성에 대한 실험결과들도 소개하였다.

이상으로부터 슛크리트 라이닝의 고성능화를 위한 기초 자료와 향후 발전방향을 제시하고자 한다.

## 2. 슛크리트 타설방법

스�크리트의 타설방법은 배합 및 작업방법에 따라 건식(dry-mix)과 습식(wet-mix)으로 구분되며, 필요에 따라 강(鋼) 또는 기타 재질의 섬유(fiber)를 혼합하여 사용할 수 있다.

1990년대 초까지는 대부분 건식방식을 적용해 왔으나, 터널과 같이 폐쇄된 공간에서는 시멘트와 급결제의 분진, 비산 등이 작업원에게 피해를 주며 시공성 저하는 물론 품질확보가 곤란하고 공사비 측면에서도 불리한 점등이 지적되었다. 이로 인해 현재 대부분의 도로 및 철도 터널 등에서는 습식 슛크리트가 사용되고 있다.

최근 들어 일본에서는 압축공기를 사용하지 않는 airless 타설장비가 개발되어 실용화 단계에 있다(Suzuki 등, 2002). Airless 타설장비는 기존 타설장비보다 분진과 리바운드가 작고 작동이 간단하며 압축공기를 사용하지 않기 때문에 크기가 소형이라는 장점을 가지고 있다. 압축공기 대신에 장비에 부착된 impeller의 고속회전에 의해 슛크리트가 타설되며 impeller head에는 4개의 날(blade)이 있으며 유압모터에 의해 최대 2,800 rpm까지 회전이 가능하다. 슛크리트가 타설된 후에 노즐로부터 액상 급결제가 분산된다(Fig. 1 및 2).

## 3. 슛크리트 재료

1990년대 중반 이전의 국내 슛크리트 관련 연구는 대부분 건식 슛크리트에만 중점을 두었으며 주로 강섬유 슛크리트에 대한 연구와 리바운드 측정 위주로 수행되었다. 최근 들어 슛크리트의 장기내구성과 환경적인 측면을 고려하여 알칼리프리게 급결제와 시멘트광물계 급결제 등과 같은 슛크리트 신재료에 대한 관심이 증대되고 있으나 급결제를 변수로 수행된 국내 연구는 매우



Fig. 1. Airless shotcrete system

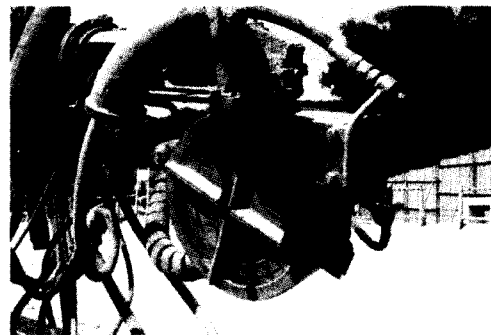


Fig. 2. Impeller head

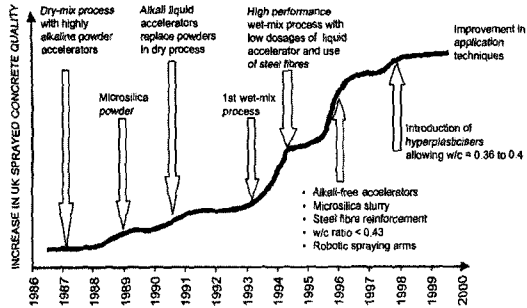


Fig. 3. History of high-performance shotcrete in Europe

미진한 실정이다 (SK건설, 2001; 한국도로공사, 2001; 박해균 등, 2002). 또한 실리카 흙 (silica fume)과 같은 고분말 재료를 혼입하는 경우 강도특성 뿐만 아니라 리바운드 감소에도 탁월한 효과가 있는 것으로 밝혀졌음에도 불구하고, 전량 수입에 의존해야 하며 비교적 고가라는 문제 때문에 국내 시공실적이 없다. 이와 같이 현재까지 슛크리트의 고성능화를 위한 국내 연구는 초기단계에 머무르고 있는 실정이다.

반면 국외에서는 슛크리트의 고강도와 고내구성화를 위하여 대부분 실리카 흙과 고성능 감수제 (superplasticizer)를 적용하고 있으며, 강섬유 부식 등으로 인한 내구성 저하를 방지하기 위하여 폴리프로필렌 (polypropylene)과 같은 합성섬유에 대한 연구를 수행 중이다. 또한 유럽통합기준 (EFNARC, 1996), ASTM (미국) 및 JSCE (일본) 등에 슛크리트 재료와 품질관리를 위한 각종 기준들이 매우 잘 정립되어 있다.

재료적인 측면에서 유럽에서의 슛크리트 발전동향을 정리하면 Fig. 3과 같다. 그림과 같이 분말형 급결제를 사용하는 건식 슛크리트는 1980년대 중반까지 사용되었으며 슛크리트의 고강도화와 고내구성화에 뛰어난

성능을 가지고 있는 microsilica, 즉 실리카 흙은 1980년대 후반부터 사용되었다. 1990년대초에는 건식 슛크리트에서 분말형 급결제가 액상형 급결제로 대체되었으며 그 이후에 습식 슛크리트와 강섬유가 일반화되었다. 또한 국내보다 일찍 1990년대 중반에 알칼리프리계 급결제를 사용하기 시작했으며 실리카 흙의 사용이 일반화되었다. 1990년대 후반에는 고성능감수제의 성능이 향상되면서 물/시멘트비를 0.36~0.4까지 낮추어 슛크리트의 고강도/고내구성화를 꾀하고 있다.

특히 터널의 내구년한을 확보하고 슛크리트 라이닝을 영구지보재로서 적용하기 위해서는 슛크리트의 내구성 확보가 필수적이다. 노르웨이에서 1980년대 중반까지 시공된 슛크리트 라이닝의 내구성을 조사한 결과 (Davik, 1996), 염수나 용수가 많은 조건에서 슛크리트의 열화현상과 강섬유 부식과 같은 내구성 저하가 관찰되어 (Fig. 4~5) 슛크리트의 내구성이 터널의 장기 안정성을 확보하기 위해 매우 중요하다는 점을 지적하였다.

이러한 배경으로 인해 Garshol (2002)은 슛크리트의 내구성에 영향을 미치는 혼화재료들을 검토하였고 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 감수효과가 있는 혼화제는 워커빌리티 (workability)를 유지하면서 40%까지 물 사용량을 줄일 수 있다. 물/시멘트비는 가장 중요한 내구성의 변수이므로 가능한 낮은 값을 사용해야 한다. 낮은 물/시멘트비는 모든 내구성 척도에 긍정적인 영향을 끼친다.
- 수화제어 혼화재료는 시멘트의 수화, 강도 및 급결제와의 반응성의 감소 없이 어느 때든지 슛크리트의 타설을 가능토록 한다.
- 알칼리프리계 급결제는 시멘트 총량의 10%까지 사



Fig. 4. Leaching of shotcrete in wet areas

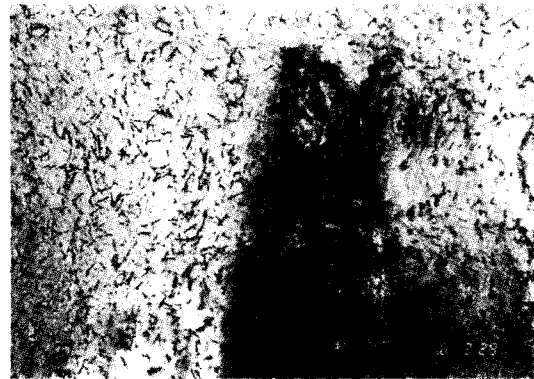


Fig. 5. Surface corrosion of steel fibers

용할 수 있으며 급결제를 사용하지 않는 동일한 배합의 콘크리트와 비교할 때 압축강도의 감소가 거의 없다. 반면 기존 급결제 종류는 30~50%까지 강도를 감소시키는 것으로 보고되고 있다.

- 양생 혼화재료 (curing admixture)는 암석에 대한 접착성을 향상시킬 뿐만 아니라 모든 내구성 변수들을 향상시킨다. 각 layer간의 강도는 1.0 MPa에서 2.0 MPa로 향상된 것으로 보고되고 있다.
- 실리카 흡은 슛크리트의 밀도, 강도, 황산염에 대한 저항성을 향상시키고 공극율을 감소시킬 수 있는 혼화재료로서 널리 알려져 있다. 실리카 흡과 낮은 물/시멘트비를 사용하면 슛크리트가 탄화 (carbonation) 되는 것을 감소시키는데 매우 큰 효과를 얻을 수 있다.

다음절에서는 슛크리트의 고강도 및 고내구성화를 위한 고성능 재료에 대해 살펴보고자 한다.

### 3.1 시멘트

스�크리트에 사용되는 시멘트는 사용목적에 고려할 때 초기강도가 크고 균질한 것이 요구되며 KS L 5021, EN 197, ASTM C 150, ASTM C 595 기준에 적합한 포틀랜드 시멘트가 주로 사용된다.

스�크리트 강도와 내구성 규정에 부합하도록 시멘트의 종류와 양을 선택해야 한다. 시멘트 양은 일반적으로 건식 슛크리트의 경우 350~450 kg/m<sup>3</sup>이며 습식 슛크리트의 경우는 400~500 kg/m<sup>3</sup>이다. 초결시간은 충분한 작업성을 가질 만큼 길어야 하지만 안전한 지보재로 작용하기 위해 필요한 초기 강도 발현을 방해할 만큼 길어서는 안된다. 일반적으로 초결은 입자 조밀도가 350 m<sup>2</sup>/kg 이상인 시멘트의 경우 1.5~3.5시간 사이이다 (EFNARC, 1999).

### 3.2 골재

골재 (aggregate)는 체적과 중량 측면에서 슛크리트의 주요 부분을 구성한다. 골재를 선택하는데 있어, 규정된 슛크리트 강도 이외에도 리바운드와 접착성과 같은 측면을 고려해야 한다. 골재의 형상, 크기 및 입도 이외에 조직, 습윤량, 세척방식 및 유기질 함유량 등을 고려해야 한다. 알칼리-실리카 반응이 발생할 가능성이 있는지도 조사해야 한다.

굳지 않은 슛크리트 (fresh shotcrete) 및 굳은 슛크리트 (hardened shotcrete)의 성능과 관련하여 골재의 품질이 매우 중요하다. 앞서 타설된 슛크리트의 손상과 리바운드를 최소화하기 위하여, 크기가 8 mm 이상인 골

재비율은 10%를 넘지 않아야 한다. 12 mm가 넘는 골재는 노즐을 막히게 하고 상당한 리바운드를 야기할 수 있기 때문에 사용하지 않아야 한다. 이로 인해 유럽통합기준에서는 습식 슛크리트에 사용되는 골재의 최대 직경을 일반적으로 8~10 mm의 범위로 규정하였으며, 이는 국내에서 통상 사용되고 있는 최대골재크기보다 작다 (EFNARC, 1996).

### 3.3 급결제

급결제 (accelerator)는 슛크리트의 조기강도를 확보하기 위해 사용되는 혼화재료로서 가장 중요한 슛크리트 재료 중의 하나이다. 그러나 급결제를 과다하게 사용하면 슛크리트의 장기강도가 감소한다는 단점을 가지고 있다.

실리케이트계 (silicate) 급결제는 조기강도 발현이 취약하며 리바운드와 분진량이 과다하기 때문에, 장기강도를 유지하기 위해서 알루미늄이트계 (aluminate) 급결제가 도입되었으나 pH가 약 14정도로 작업자 화상의 위험이 있다. 이와 같은 기존 급결제의 단점을 보완하는 환경 친화적인 새로운 급결제로서, 유럽에서 1990년대 중반 이후로 널리 적용되고 있는 알칼리프리계 (alkali-free) 급결제와 일본에서 개발된 시멘트 광물계 분말 급결제를 들 수 있다.

알칼리프리계 액상형 급결제는 조기 및 장기강도 발현이 우수하고 작업자의 안전을 확보하는 환경 친화적인 제품으로 각광받고 있다. 하지만 국내에서의 시공실적이 거의 없으며 비교적 단가가 높고 압송관 등에서 부식이 발생할 수 있으며, 일부 제품의 경우 용수부위에서 조기강도의 발현이 다소 늦어진다고 논의되고 있다.

한편 일본에서는 1960년대부터 강알칼리의 액상형 급결제를 사용해 왔으며 그 후 시멘트 광물계의 분말형 급결제가 개발되어 1980년대부터 분말형 급결제에 대한 사용 비율이 점차 증가하고 있다. 시멘트 광물계 급결제는 시멘트 중에 존재할 수 있는 급결성 광물을 별도로 합성하여 분쇄한 분말형 급결제로서 시멘트의 광물을 이용하기 때문에 급결성이 뛰어나고 강도의 발현이 안정적이기 때문에 특수시멘트가 발달한 일본에서는 급결제 시장의 90% 이상을 점유하고 있다. 시멘트 광물계 급결제의 가장 큰 특징은 급결력이 강하기 때문에 용수부위에서 슛크리트 타설이 용이하며 장기강도의 손실이 극히 적다는 점이다. 이러한 장점에 의해 리바운드량의 감소와 함께 장기 강도를 높이기 위해 시멘트량을 절감할 수 있다. 또한 시멘트와 유사한 자극성 및 pH특성을 보이고 있어 환경오염 및 유해성이 적으며 분말이므로 콘크리트의 슬럼프 변화가 적어 현장에

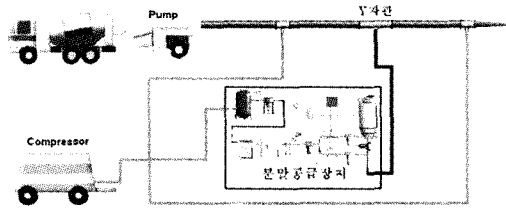


Fig. 6. Dosing system of Calciumo-aluminate based accelerator

서 숯크리트의 품질관리가 용이한 장점을 가지고 있다. 하지만 광물계 급결제는 분말이기 때문에 현재 사용되는 액상급결제의 시공장비로는 시공이 힘들며 별도의 분말전용 공급장치를 필요로 한다 (Fig. 6). 국내에서도 시멘트 광물계에 대한 성능의 우수성이 다수의 현장에서 시험시공을 통해 밝혀진 바 있다.

3.4 보강재

시공성을 향상시키고 리바운드를 감소시키기 위하여 기존의 wire mesh는 대부분 강섬유로 대체된 실정이다. 그러나 앞에서 지적한 바와 같이 강섬유의 부식으로 인한 장기 내구성의 감소가 발생할 수 있기 때문에 내구성을 향상시키기 위하여 폴리프로필렌 등에 대한 연구가 수행되고 있다. 그러나 아직까지 강섬유와 비교할 때 폴리프로필렌 보강 숯크리트의 인성이 다소 취약한 면이 있으므로 휨인성을 향상시키기 위해 보강용 합성섬유에 대한 연구도 국외에서 수행 중에 있다.

3.5 혼화제

숯크리트의 대표적인 혼화제로 실리카 흙을 들 수 있다. 국외의 경우를 살펴볼 때 실리카 흙은 숯크리트의 고강도/고내구성화를 위해 필수적이라고 할 수 있다. 또한 강도와 내구성뿐만 아니라 점착력과 부착력을 증가시켜 리바운드가 감소되는 효과도 가지고 있다 (Fig. 7). 그러나 실리카 흙의 조밀성으로 인하여 높은 비율의 감수제 또는 고성능 감수제를 첨가해야 한다. 또한 실리카 흙의 생산에 많은 전력이 소요되므로 전력비용이 비싼 국내에서는 생산이 불가능하여 전량 수입할 수밖에 없다. 이러한 점으로 인해 아직까지 국내 숯크리트에 실리카 흙을 적용한 실적이 없으며 실리카 흙을 대체할 수 있는 고성능의 국산 혼화제의 개발이 필요한 실정이다.

3.6 혼화제

숯크리트의 대표적인 혼화제로 유동화제 (plasticizer) 와 고성능 감수제 (super-plasticizer)를 들 수 있으며,

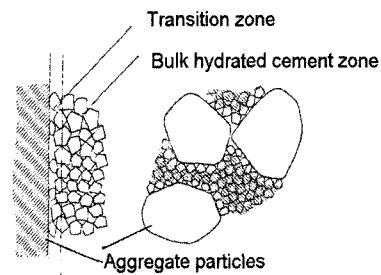


Fig. 7. Improvement of concrete performance by silica fume

단위수량을 감소시켜 부착성과 강도를 향상시키며 굳지 않은 콘크리트의 유동성과 작업성을 향상시킨다. 일반적으로 물/시멘트비의 저감과 고강도화 목적으로 사용할 때는 고성능 감수제라 하며, 동일한 물/시멘트비에서 콘크리트/숯크리트 품질의 변동없이 작업성을 향상시킬 때는 유동화제라고 한다.

성분에 따라 멜라민계, 나프탈렌계 및 폴리카르복실계로 구분할 수 있다. 멜라민계는 성능이 떨어져 최근에 적용사례가 감소하고 있으며 나프탈렌계는 효율은 떨어지지만 저렴하므로 많이 적용되고 있다. 국외에서는 기존 멜라민계나 나프탈렌계와 비교하여 상당한 감수효과와 부착력 상승효과를 가진 폴리카르복실계의 고성능감수제가 일반화되고 있으나 국내에서는 단가문제로 적용 실적이 매우 적은 실정이다.

3.7 고성능 숯크리트 배합설계 사례

Table 1은 총 연장이 24 km로서 세계 최장대 터널인 노르웨이의 Lærdal Tunnel에 적용되었던 숯크리트 배합설계의 예이다. 표에서 알 수 있듯이 국외 고성능 숯크리트에 사용되는 골재의 크기는 0~8 mm로 국내의 최대 골재크기보다 다소 작으며, 초기 및 장기강도의 확보와 작업환경을 고려하여 알칼리프리게 급결제를 시멘트 중량의 6~9%로 적용하였다. 또한 숯크리트의

**Table 1.** Mix design applied in Lærdal tunnel (Norway)

Mix design	
Cement (CEM 42.5)	439 kg/m <sup>3</sup>
Aggregate (0 ~ 8 mm)	1,670 kg/m <sup>3</sup>
Silica fume (Microsilica)	30 kg/m <sup>3</sup>
Super-plasticizer (Glenium T803)	2.7 kg/m <sup>3</sup>
Concrete Improver (MEYCO TCC735)	5 kg/m <sup>3</sup>
Steel fiber (Dramix 30/50)	44 kg/m <sup>3</sup>
Water/Cement ratio	0.42
Slump	20 ~ 22 cm
Thickness applied	10 ~ 15 cm
Alkali-free accelerator (MEYCO SA 161)	7.5 %
Rebound	< 5 %

Ages	Compressive strength (MPa)
30 minutes	0.8~0.9
28 days	~ 42

고강도/고내구성화 및 부착력을 향상시키기 위해 micro-silica와 같은 실리카 흡이 필수적으로 사용되었고, 작업성 개선과 강도향상을 위해 시멘트 중량의 0.3~1.0% 정도로 고성능감수제를 사용하였다. 물/시멘트비는 일반적으로 0.40~0.45의 범위이다. 때에 따라서는 concrete improver나 수화제어제와 같은 신 재료를 적용한 경우도 보고되고 있다. Table 1의 배합을 적용한 경우에 재령 28일의 압축강도는 42 MPa까지 측정되어 고강도의 슛크리트가 생산되었음을 알 수 있다.

#### 4. 슛크리트 품질기준 및 시험방법

##### 4.1 국내의 슛크리트 품질기준

건설교통부에서 제정한 터널표준시방서 (1999)와 터널설계기준 (1999)을 참고하면, 슛크리트는 필요한 강도와 내구성이 확보되고 부착성과 시공성이 양호하며 재령 1일 압축강도가 100 kgf/cm<sup>2</sup> 이상, 재령 28일 강도가 180 kgf/cm<sup>2</sup> 이상 되도록 배합하여야 한다고 규정하고 있다 (Table 2). 슛크리트의 최소두께는 사용목적, 지반조건, 단면크기 등을 고려해서 정하되 3~5 cm로

할 것을 규정하고 있다. 그러나 휨강도 및 휨인성 등에 대한 규정이 제시되어 있지 않으며 또한 슛크리트 재료에 대한 정량적인 지침도 부족한 실정이다.

한국도로공사에서는 보다 정량적으로 슛크리트의 압축강도, 휨강도, 휨인성, 강섬유혼입량 등에 대한 기준을 제시하고 있으나 외국의 고성능 슛크리트에 대한 기준과 비교할 때는 아직까지 다소 낮은 수준이며 슛크리트 재료 및 제반 품질관리 시험에 대한 규정이 부족한 실정이다.

##### 4.2 국외의 슛크리트 품질기준

국내 기준과 비교할 때 선진 외국에서는 Table 3과 같이 슛크리트에 대해 비교적 고강도의 기준을 적용하고 있다 (Malmberg, 1993). 특히 노르웨이에서는 슛크리트의 영구지보재화를 위해 압축강도 기준이 1980년대의 25MPa에서 현재에는 45MPa로 상향조정되었다. 이러한 배경에 근거하여 Clements (2002)는 Table 4와 같이 슛크리트의 발전단계를 예상하였다.

또한 유럽통합기준에서 규정하고 있는 휨강도와 휨인성은 각각 Table 5~7과 같다. 여기서 휨인성은 빔 시험에서 얻어지는 잔류강도등급 (residual strength class)이나 평판시험에서 결정되는 에너지흡수등급 (energy absorption class)으로 규정된다. 또한 슛크리트의 접착강도 (bond strength)에 대한 기준은 Table 8과 같으며, 이외에도 투수계수, 동결융해저항성, 밀도, 화학적 저항성과 같은 내구성 관련 지표에 대한 기준을 제시하고 있다 (EFNARC, 1996).

또한 국내에는 초기재령과 장기 내구성과 관련된 기준과 시험방법이 정립되어 있지 않으나, 유럽통합기준과 일본에서는 압축강도 외에도 초기재령에서 장기재령까지 슛크리트의 제반 역학적 특성과 내구성 지표에 대한 기준과 시험방법을 제시하고 있다 (Table 9).

##### 4.3 공기압식 pin 관입시험에 의한 슛크리트 압축강도의 추정

지반과 슛크리트의 상호작용 측면에서, 지반의 지지력이 충분히 발휘되기 이전에 지반하중을 지지할 수 있는 초기재령의 1~2일 강도가 중요한 것으로 보고되고 있다. 그러나 초기재령에서는 슛크리트 공시체를 제작하기 어려우며, 코어링을 수행할 만큼 슛크리트의 조기

**Table 2.** Specifications for compressive strength of shotcrete in Korea (28 days, kgf/cm<sup>2</sup>)

	Ministry of Construction & Transportation	Korea Highway Corporation	Seoul Metropolitan Subway Construction Headquarters
UCS	180	200	210

**Table 3.** Requirements for compressive strength of shotcrete

Age of Shotcrete	Compressive strength (MPa)	Reference Source
8 hours	5	Wood(1992)
1 day	5	Japan Tunnelling Assoc. (1991)
	7	Austria(J1기준)
	8*	AFTES(1992), Great Britain
	9	Austria(J2기준)
	10	EFNARC(1992) 등
3 days	20	Wood(1992)
7 days	17*	AFTES(1992)
	25	EFNARC(1992)
	30	Morgan(1991), Wood(1992)
	30	Japan Tunnelling Assoc. (1991)
28 days	18	Japan Tunnelling Assoc. (1991)
	25**	AFTES(1992)
	30	JCI(1991), EFNARC(1992)
	35	Great Britain, Stockholm City Streets and Traffic Admin. (1990)
	35***	Maidl(1992)
	38	Austria(J1기준)
	40*	Maidl(1992)
40	Austria(J2기준), Morgan(1991)	
90 days	45	Swedish Railroad Dept.(1991)
	35	EFNARC(1992)

\* Arithmetic mean    \*\* Characteristic strength    \*\*\* Single value  
 EFNARC: European Specification for Sprayed Concrete  
 AFTES: French Tunnelling Association    JCI: Japan Concrete Institute

**Table 4.** Development of sprayed concrete

Parameter	1980s	2000s	2020s	Comment
UCS	25 MPa	40 MPa	40 MPa	No difficulty remains here
Rebound	30 %	10 %	5 %	Small gains still possible
Accelerator	Water glass works well	Alkali-free Safe	Safe and works well	Some way to go yet
Productivity	6 m <sup>3</sup> /hr	8 m <sup>3</sup> /hr	10 m <sup>3</sup> /hr	Productivity hampered by cost
Cost (same \$)	100	125	75	Requires lower cost base
Toughness (round panel)	200 J	400 J	1,000 J	Major advances still to come
Health and safety	Poor	Good	Much better	Standards keep rising

**Table 5.** Requirements for flexural strength (EFNARC, 1996)

Minimum flexural strength (MPa)			
Strength class	C24/30	C36/45	C44/55
Beam flexural strength	3.4	4.2	4.6

강도가 충분하지 않기 때문에 슛크리트의 조기강도를 측정하기 위한 많은 간접적인 시험방법들이 요구되고 있다.

스�크리트의 강도를 추정하기 위한 대표적인 시험방법으로는 인발시험, 칩 관입시험, 화약의 폭발력을 이용하는 pin 관입시험, 슈미트해머 시험 등이 있으나, 시험과정이 어렵거나 측정가능한 강도범위가 낮고 시험결과의 신뢰성이 떨어지는 등 많은 문제점을 가지고 있다 (Iwaki, 2001). 이 가운데 화약의 폭발력을 이용하는 pin 관입시험은 시험이 단순하며 낮은 강도에서 고강도까지 슛크리트 강도를 추정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 화약을 사용하기 때문에 pin 관입시험을 수행하기 위해서는 총포화약류 면허 등이 필요하며 사

**Table 6.** Residual strength class definition points (EFNARC, 1996)

Deformation class	Beam deflection (mm)	Residual stress (MPa) for strength class			
		1	2	3	4
Low	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
	1	1.3	2.3	3.3	4.3
Normal	2	1.0	2.0	3.0	4.0
High	4	0.5	1.5	2.5	3.5

**Table 7.** Energy absorption requirements (EFNARC, 1996)

Toughness classification	Energy absorption in joules for deflection up to 25mm (J)
a	500
b	700
c	1000

**Table 8.** Bond strength: minimum requirements (EFNARC, 1996)

Type of bond	Minimum bond strength to concrete (MPa)	Minimum bond strength to rock (MPa)
Non structural	0.5	0.1
Structural	1.0	0.5

용상 위험한 상황이 발생할 수 있다는 문제점을 가지고 있다.

이러한 단점들을 보완하고자 일본에서는 화약의 폭발력 대신 고압의 압축공기를 사용하는 공기압식 pin 관입시험 방법 (pneumatic pin penetration test)이 제안되었고, 현재 일본도로공단 (Japan Highway Public Corporation)의 슛크리트 강도시험 방법으로 규정되어 있다 (Iwaki, 2001). 공기압식 pin 관입시험은 압축공기를 사용하기 때문에 안전하다는 장점 이외에, 낮은 강도부터 최대 30 MPa까지 넓은 범위의 강도를 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

이러한 배경에 근거하여 이석원 등 (2003)은 초기재령의 슛크리트 압축강도를 현장에서 쉽고 빠르게 측정하기 위한 공기압식 pin 관입시험의 적용성을 평가하였다 (Fig. 8). 그 결과, 공기압식 pin 관입시험으로부터 초기재령의 슛크리트 강도를 실제 압축강도와 유사하게 잘 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 슛크리트의 경화가 계속 진행되어 강도가 수렴됨에 따라 pin 관입시험에 의한 추정강도와 실제 압축강도 사이의 차이가 점차 증가하였다 (Fig. 9). 이러한 원인은 크기효과, 슛크리트 표면의 경도, 초기재령 이후에 조골재로

인한 영향 그리고 인발시험으로부터 유도된 관계식에 기인한 것으로 보인다. 따라서 공기압식 pin 관입시험을 초기재령 이후의 슛크리트 강도를 추정하는데 적용하기 위해서는 이러한 영향들을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 논의하였다. 또한 슈미트해머 시험은 슛크리트 강도를 추정하기 위한 변별력있는 방법으로 고려하기 어려울 것으로 지적하였다.

## 5. 슛크리트 라이닝의 설계 및 해석

스�크리트 라이닝의 역학적 특성들은 타설 후 시간에 따라 증가하며, 또한 슛크리트 라이닝이 경화됨에 따라 슛크리트 라이닝에 점진적으로 지반 하중이 작용하게 된다. 이러한 슛크리트 라이닝의 시간의존적인 거동은 터널을 굴착하는 동안 전체 지보시스템의 안정성뿐만 아니라 슛크리트 라이닝의 최종 평형상태와 안전율에 영향을 끼친다.

그러나 현재까지 슛크리트 라이닝의 시간의존적 특성들을 설계에 정확히 반영하지 못하고 있는 실정이다. 대부분의 2차원 해석에서는 하중분담을 개념을 도입하여 굴착단계에 따른 슛크리트 라이닝의 경화 특성을 고려하려고 하고 있으나, 합리적인 하중분담율의 산정과 하중분담율의 개념에 대한 많은 문제점들이 지적되고 있다. 3차원 해석에서도 역시 시간 차원인 슛크리트의 경화특성을 정적 해석으로 정확히 고려하기 어려우며, 해석에 많은 시간과 노력이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 최근 들어 슛크리트의 경화특성을 모사하기 위한 수치모델들이 개발되고 있으나, 모델상수들을 일반적인 실험실시험으로부터 결정하기 어려우며 기존 해석 프로그램들에 적용하는데 한계가 있다.

또한 지보재의 평균 강성을 이용하여 지반과 지보시스템의 상호작용을 해석할 수 있는 이론적 해석방법인 수렴-구속법 (convergence-confinement method)이 널리 적용되고 있다 (Hoek & Brown, 1980). 하지만 이와 같이 지보재가 설치시부터 일정한 강성을 가진다고 가정하는 이론적 해석에서는 슛크리트 라이닝의 정확한



Table 9. Test items for quality control of shotcrete

Ages		Test items		Europe	Japan
Fresh concrete	Wet-mix	Consistency		○	○
		Air content		○	△
		Specific gravity		○	○
	Dry-mix	Water/Cement ratio		○	○
		Steel fiber reinforced	Fiber content		○
	Slump		○	○	
	Air content		○	△	
	Specific gravity		○	○	
< 24 hours	Compressive strength	Pull-out test		○	○
		Schmidt hammer test		○	△
		Compression test by Beam specimens		-	○
		Modified penetration test		○	-
		Pin penetration test		○	-
		Pneumatic pin penetration test		-	○
> 24 hours	Quality control	Compressive strength	Boring core	○	○
			Beam mould	-	○
	Mechanical properties	Tensile strength	Indirect tensile test	○	△
			Direct tensile test	○	-
		Bond test		○	-
		Flexural strength		○	□
		Flexural toughness		○	□
		Shear strength		-	△
	Others	Frost resistance		○	-
		Density		○	○
Chemical resistance		○	-		
Permeability		○	-		

Note) ○: General, △: Rare, □: Only for high strength and steel fiber reinforced shotcrete -: None



Fig. 8. Pneumatic pin penetration test at tunnel wall

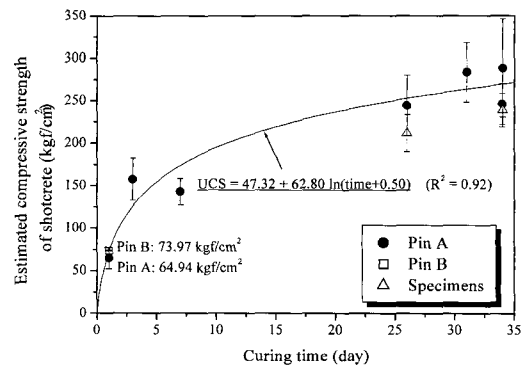


Fig. 9. Comparisons between actual uniaxial compressive strengths of shotcrete cores and their estimated compressive strengths from the pneumatic pin penetration tests

응력상태를 평가할 수 없으며 터널 굴착단계와 같은 시공성을 고려하지 못한다.

특히 국내의 지보패턴 설계는 이론적 근거없이 경험적 설계에 의존하고 있으며 슛크리트 라이닝의 설계두께 및 설계강도 등에 대한 정량적인 기준이 없다. 더욱이 3차선 이상의 대단면 터널에 대한 표준지보패턴도 제시되어 있지 않아 다양한 지반조건에서 체계적인 지보패턴의 이론적 해석과정이 필요하다.

본 장에서는 슛크리트 라이닝에 대한 새로운 해석 기법으로서, 슛크리트의 경화특성을 고려한 슛크리트 라이닝과 지반의 상호작용에 대한 이론적 해석사례 및 슛크리트 라이닝의 설계변수에 대한 민감도 분석 사례를 소개하고자 한다.

**5.1 슛크리트 라이닝의 경화특성을 고려한 이론적 해석**

장수호 등 (2003)은 슛크리트 라이닝의 시간의존적 경화특성을 고려한 이론적 해석을 통해 지반과 슛크리트 라이닝간의 상호작용을 해석하였다. 이때 슛크리트 라이닝의 시간의존적 특성을 고려한 해석을 위하여 Oreste (2003)가 제안한 이론적 해석방법을 적용하였다. 이러한 이론적 해석방법에서는 슛크리트의 압축강도와 탄성계수의 경화특성 뿐만 아니라 터널의 굴진장과 슛크리트 라이닝의 설치와 경화에 필요한 시간 등과 같은 시공성을 고려할 수 있다. 그러나 슛크리트 라이닝과 록볼트 또는 강지보와의 복합 지보시스템이 고려되지 못하고 있어 복합 지보시스템의 강성이 각 지보재 강성들의 합과 동일하다는 가정 (Hoek & Brown, 1980)을 도입하여 적용하였다.

해석 결과, 슛크리트 타설시부터 일정한 강성을 가지는 경우와 시간의존적 경화특성을 고려한 경우의 평형

점 (equilibrium point)은 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다 (Fig. 10). 또한 슛크리트의 급결성이 빠를수록 터널의 변형을 억제하지만 그만큼 슛크리트가 부담해야 하는 지보압이 커지므로 동일한 강도조건에서 안전율이 감소하였다 (Fig. 11). 슛크리트의 안전율 확보 측면에 있어서는 슛크리트의 두께보다는 강도를 증진시키는 것이 효과적인 것으로 파악되었다.

**5.2 슛크리트 라이닝의 설계변수에 대한 민감도 분석**

배규진 등 (2003)은 슛크리트 라이닝의 각종 설계변수들에 대해 민감도분석 (sensitivity analysis)을 실시하여 슛크리트와 지반의 상호작용 측면에서 중요한 영향을 미치는 주요 설계인자들을 평가하고자 하였다. 여기서 민감도분석은 이러한 입력변수들과 모델 변수들의 불확실성을 평가하는 방법이다. 또한 민감도분석은 모델의 출력이 입력변수들의 변화에 어떻게 영향을 받는 지 평가하여 모델의 신뢰성과 예측결과에 대한 신뢰성을 향상시키기 위해 사용된다.

UDEc 해석을 통해 슛크리트 요소 물성 6가지와 인터페이스 물성 6가지, 즉 총 12개의 슛크리트 관련 설계변수가 지반과 슛크리트 라이닝의 거동에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다. 출력변수로는 슛크리트 라이닝 축력 외 9가지의 해석결과를 대상으로 하였다. 총 45개의 sample조건에 대해 UDEc 해석을 실시하였으며 민감도 분석에는 SimLab ver 1.0을 사용하였다.

민감도 분석 결과, 슛크리트의 탄성계수와 인터페이스의 전단강성이 슛크리트 라이닝과 지반의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 슛크리트의 탄성계수는 슛크리트 라이닝의 전단력과 모멘트 등에 절대적인 영향을 미치며 거의 선형적인 관계를 보였

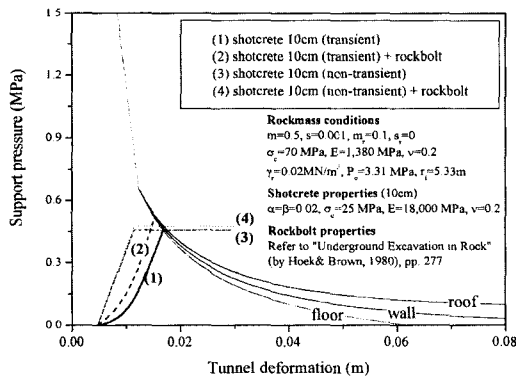


Fig. 10. Analysis of ground-support reactions considering transient hardening behaviors of shotcrete

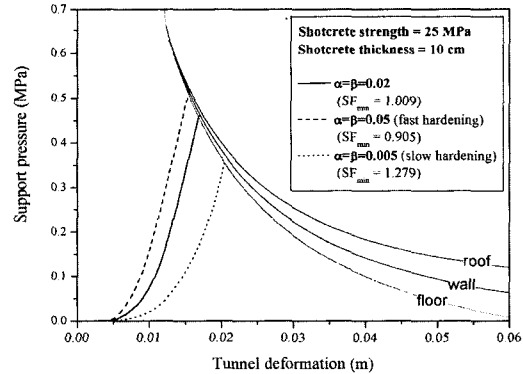


Fig. 11. Ground-Support reactions depending on different hardening velocities of shotcrete

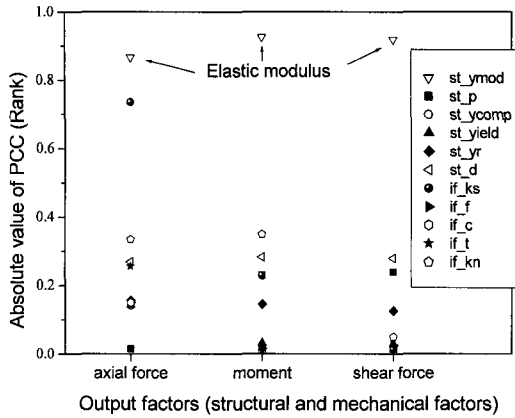


Fig. 12. Sensitivities of mechanical and interfacial properties of shotcrete on mechanical behaviors of shotcrete lining

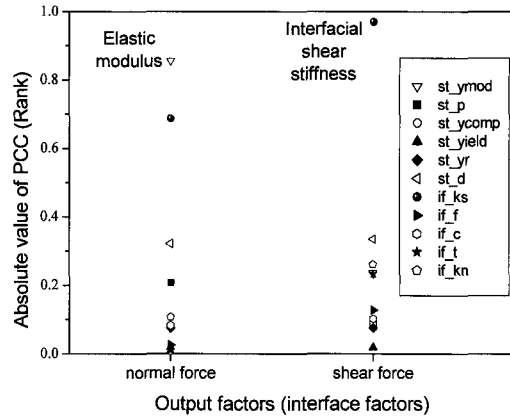


Fig. 13. Sensitivities of mechanical and interfacial properties of shotcrete on behaviors at interface between rock mass and shotcrete lining

다 (Fig. 12). 따라서 터널의 안정성을 향상시키기 위해서는 지반과의 상호작용을 고려하여 강도뿐만 아니라 쏘크리트의 탄성계수를 향상시킬 필요가 있으며, 입력물성 산정시 쏘크리트 배합조건에 따라 실제 실험 등을 통해 가장 주의를 기울여 결정해야 할 것으로 판단되었다.

또한 지반하중이 쏘크리트 라이닝에 전달되는 과정에서 인터페이스의 전단강성이 지반과 쏘크리트 라이닝 사이의 상호작용에 주된 역할을 한다는 것을 알 수 있었다 (Fig. 13). 따라서 인터페이스의 전단강성을 보다 신중하게 결정할 필요가 있으며 이를 규명하기 위한 실험적 연구가 필요할 것이다. 그리고 지반과 쏘크리트 라이닝간의 상호작용에 대한 해석결과의 신뢰도를 향

상시키기 위해서 이 연구에서 적용한 바와 같이 지반과 쏘크리트 라이닝 사이의 인터페이스를 고려한 해석이 필요할 것이다.

이와 같이 부착강도와 같은 인터페이스 특성이 지반과 쏘크리트 라이닝의 상호작용에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있지만, 재령별 인터페이스 특성에 대한 연구가 매우 미진한 실정이다. 따라서 Bae 등 (2004)은 실제 터널현장에서 회수된 쏘크리트/암석코어에 대해 직접전단시험과 수직압축시험을 실시하였고, 그 결과 Fig. 14 및 15와 같이 쏘크리트의 역학적 특성뿐만 아니라 인터페이스 특성도 시간의존적인 경화특성을 보이는 것으로 나타났다.

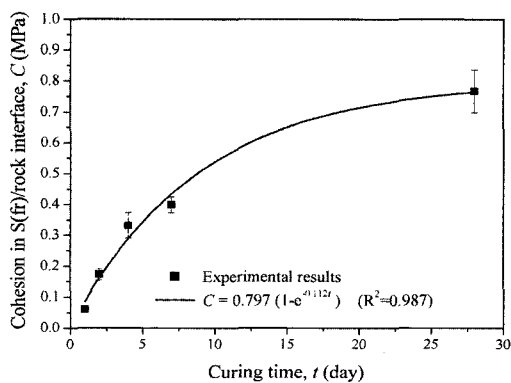


Fig. 14. Time-dependent behaviour of cohesion at interface

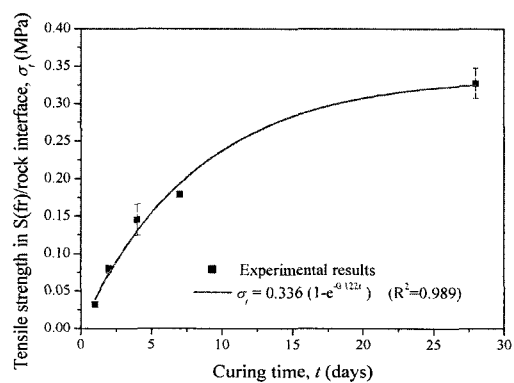


Fig. 15. Time-dependent behavior of tensile strength at interface

## 6. 고성능 슛크리트 라이닝을 적용하고 있는 국외 신 터널공법

NATM터널은 2차 라이닝과 슛크리트 사이에 방수시트가 설치되어 전단력의 전달이 방해되므로 슛크리트와 2차 라이닝 사이에 전단력이 전달되지 않는 이중구조(double-shell)이다. 그러나 싱글셸은 지보재와 지반이 일체화되어 상호간에 전단력이 전달되는 구조로서 역학적 측면에서 매우 유리하다. 대표적인 싱글셸 공법에는 노르웨이의 NMT (Norwegian Method of Tunnelling), 일본과 독일 등에서 적용되고 있는 싱글셸 NATM 그리고 일본의 NTL (New Tunnel Lining) 등이 있다.

### 6.1 NMT

노르웨이에서 정립된 NMT는 Q 시스템에 의한 지반 분류에 의해 사전에 보강량을 결정하는 실시설계 개념으로서 고강도의 강섬유보강 슛크리트와 방부식 고성능 록볼트를 터널의 영구지보재로 적용하여 현장타설 콘크리트 라이닝을 생략하는 방법이다.

NMT가 도입되기 이전에 사용되던 와이어메쉬 보강 슛크리트와 레티스 거더 (lattice girder)는 비실용적이고 많은 시간이 소요되며 불필요하게 콘크리트의 소비를 증가시킨다. 이러한 이유로 인하여 노르웨이에서는 1983년에서 1984년까지 기존의 와이어메쉬 보강 슛크리트를 습식 강섬유보강 슛크리트로 대체하였으며, 그 이후 주요 도로터널, 철도터널, 대규모공동 그리고 1991년에서 1992년까지 건설된 62m 경간의 요빅 올림픽 경기장 공동에까지 록볼트와 강섬유 보강 슛크리트를 영구 지보재로써 사용함에 따라 1992년에 NMT 개념이 정립되었다 (Barton, 1998).

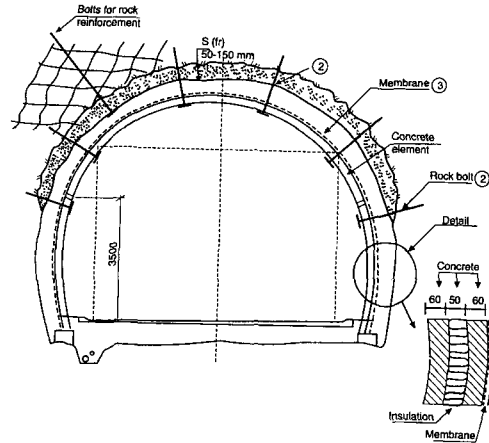


Fig. 16. Typical cross-section of a NMT tunnel

NMT에서는 슛크리트와 록볼트를 영구지보재로 사용하기 때문에 고강도/고내구성의 슛크리트와 방부식 CT 볼트를 적용하고 있다. 또한 NMT에서는 현장타설 콘크리트 대신 필요한 경우 미관이나 방·배수를 위한 마감재로 프리캐스트 콘크리트 라이닝 (PCL, Precast Concrete Lining)을 적용하고 있다 (Fig. 16). NMT는 경암위주의 지반에 주로 적용되며 빠른 공기와 높은 경제성을 가지고 있어 노르웨이의 지반조건과 유사한 국내에도 충분한 적용성이 있을 것으로 기대된다.

### 6.2 싱글셸 NATM

싱글셸 NATM은 고품질의 슛크리트와 록볼트를 영구 지보재로 사용하여 NATM의 2차 라이닝 대신 지반 조건과 계층결과에 따라 여러 층의 슛크리트를 타설하여 일체화시키는 공법으로 기타 사항은 NATM과 동일하다 (Fig. 17). 싱글셸 NATM에서 사용되는 슛크리트

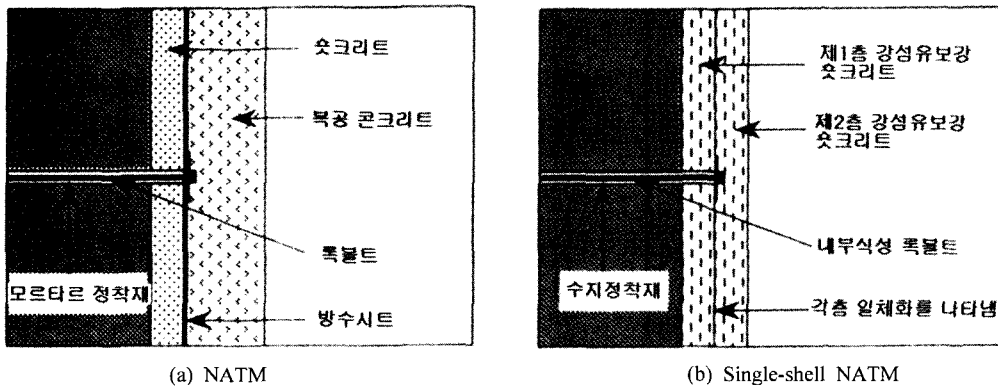


Fig. 17. Schematic diagrams of support structures in NATM and Single-shell NATM

는 지보와 라이닝 기능을 동시에 갖춘 고품질 슛크리트 이어야 하며 일본에서는 노르웨이의 슛크리트 설계기준과 유사하게 적용하고 있다. 또한 록볼트는 영구 지보재로 사용될 수 있도록 고내력, 내부식성의 록볼트이어야 하며 일본의 경우에는 FRP 록볼트가 적용되고 있다. 일본에서는 지반등급을 6가지로 분류하고 있으며 Q 시스템을 일본 실정에 맞게 수정하여 적용하고 있다. 또한 NMT와 마찬가지로 방·배수와 미관 목적으로 필요한 경우 PCL을 설치한다 (ジェオフロンテ研究會, 2001a).

**6.3 NTL 공법**

일본에서 개발된 NTL공법은 기존의 슛크리트 공법을 대신하는 새로운 지보 및 라이닝 공법으로서, 거푸집 등을 구비한 장비와 고유동성, 급경성, 조강성을 갖는 현장타설 콘크리트 (샤브콘)를 적용하여 지반과 밀착된 콘크리트 라이닝을 구축하는 방법이다 (Fig. 18 및 19). 거푸집내에 콘크리트를 직접 타설하며 짧은 시간의 양생으로 탈형에 필요한 강도에 도달하게 된다. 현장타설 콘크리트를 지반과 직접 밀착시킴으로 급결제를 사용하는 슛크리트에 비해 장기강도가 우수하고 여굴을 허용할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 조기강도

가 확보되어야 하며 고가의 거푸집 장비를 사용한다는 단점을 가지고 있다 (ジェオフロンテ研究會, 2001b).

**7. 결 론**

- 1) 터널의 장기 내구성을 확보하고 역학적·경제적인 측면에서 많은 장점을 가지고 있는 싱글셀 터널공법과 같은 신공법을 적용하기 위해 고강도/고내구성 슛크리트의 개발이 요구되고 있다.
- 2) 선진외국에서는 고강도·고내구성의 고성능 슛크리트를 위하여 알칼리프리계 또는 시멘트광물계 급결제, 실리카 흙 및 고성능 감수제가 필수적으로 사용되고 있다. 또한 강섬유 부식 등으로 인한 내구성 저하를 방지하기 위하여 폴리프로필렌과 같은 합성섬유에 대한 연구가 진행 중이다.
- 3) 국내의 슛크리트 설계기준은 압축강도 위주로 되어 있으나, 국외에서는 압축강도 이외에 휨강도, 휨인성, 부착강도 등의 다양한 역학적 특성에 대한 기준이 제시되어 있다. 특히 동결융해저항성, 투수계수 등의 내구성 관련 지표에 대한 기준도 마련되어 있다. 따라서 국내에서도 슛크리트의 고성능화를 위하여 다양한 기준 정립과 품질시험의 확립이 요구된다.
- 4) 국내의 지보패턴 설계는 이론적 근거없이 경험적 설계에 의존하고 있는 실정이다. 특히 슛크리트의 설계두께 및 설계강도 등에 대한 정량적인 기준이 없으며, 3차선 이상의 대단면 터널에 대한 표준지보패턴도 제시되어 있지 않다. 따라서 슛크리트 라이닝의 시간의존적인 경화특성을 고려한 해석 등을 통해 다양한 지반조건에 따른 터널 지보패턴의 이론적 설계와 합리적인 하중분담율의 산정이 필요하다.
- 5) 슛크리트의 급결성이 빠를수록 터널의 변형을 억제하지만 그만큼 슛크리트가 부담해야 하는 지보압이 커지므로 동일 강도조건에서 안전율이 감소한다. 또한 안전율 확보측면에서 슛크리트 라이닝의 두께보다 강도를 증진시키는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 그리고 민감도 분석 결과, 슛크리트 라이닝의 제반 설계변수들 가운데 탄성계수와 인터페이스 전단강성이 지반과의 상호작용에 가장 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타나 이들 설계변수에 대한 입력물성 산정에 유의해야 할 것이다.

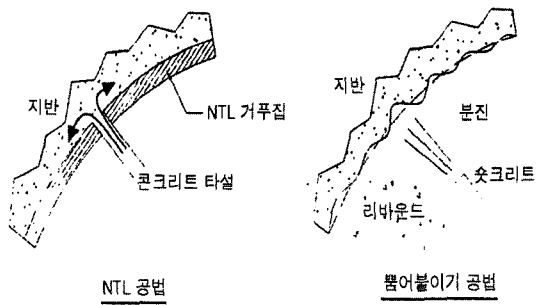


Fig. 18. Comparisons between NTL method and shotcrete lining

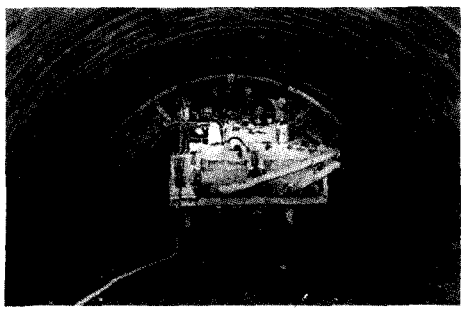


Fig. 19. Cast in NTL method

**감사의 글**

본 연구는 삼성물산(주) 건설부문이 지원한 “고성능 슛크리트 라이닝의 개발” 연구사업으로 수행된 것으로 삼성물산(주) 건설부문 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 건설교통부, 1999, 터널설계기준, 구미서관.
2. 건설교통부, 1999, 터널표준시방서, 구미서관.
3. 박해균, 이명섭, 김재권, 정명근, 2002, 고품질 슛크리트 개발을 위한 새로운 급결제 적용, 한국터널공학회 논문집, 4.1, 45-55.
4. 배규진, 이두화, 장수호, 김영근, 2003, 슛크리트 라이닝의 거동해석에 영향을 미치는 입력변수들에 대한 민감도분석, 대한토목학회논문집, 23,5C, 345-356.
5. SK건설, 서울대학교, 2001, 습식 슛크리트 공법 고성능화 연구, 1999년 산·학·연 공동연구개발사업 최종보고서, 건설교통부·한국건설기술연구원.
6. 이석원, 배규진, 장수호, 박해균, 이명섭, 김재권, 2003, 슛크리트의 압축강도를 추정하기 위한 공기압식 pin 관입시험의 적용성 평가, 2003년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 4723-4728.
7. 장수호, 배규진, 이석원, 박해균, 이명섭, 김재권, 2003, 슛크리트 라이닝의 시간의존적 경화특성을 고려한 이론적 해석, 2003년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 4795-4800.
8. 한국도로공사 도로연구소, 2001, 강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준 정립(II), 도로연 01-37.
9. ジェオフロンテ研究会 シングルシェル分科會, 2001, シングルシェルトンネルのケーススタディ報告書, 日本ジェオフロンテ研究会.
10. ジェオフロンテ研究会 シングルシェル分科會, 2001, NTL工法の活用報告書-シングルシェル・ライニングとトンネル・リニューアルへの適用, 日本ジェオフロンテ研究会.
11. Bae, Gyu-Jin, Chang, Soo-Ho, Lee, Seok-Won, Park, Hae-Geun, 2004, Evaluation of interfacial properties between rock mass and shotcrete, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 41.3, 373-373.
12. Barton, N., 1998, Norwegian Method of Tunnelling - The Theory and Practice of NMT, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd., Bau Consultant, Nick Barton and Associates.
13. Clements, M.J., 2002, The Future of Fibre Reinforced Sprayed Concrete, Proc. the 4th Int. Symp. on Sprayed Concrete, Norwegian Concrete Association, 73-81.
14. Davik, K.I., 1996, Durability of sprayed concrete in subsea road tunnels, Proc. the 2nd Int. Symp. on Sprayed Concrete, Norwegian Concrete Association, 333-344.
15. EFNARC, 1996, European Specification for Sprayed Concrete.
16. EFNARC, 1999, European Specification for Sprayed Concrete - Guidelines for Specifiers and Contractors.
17. Garshol, K. F., 2002, Admixtures and other factors influencing durability of sprayed concrete, Proc. the 4th Int. Symp. on Sprayed Concrete, Norwegian Concrete Association, 123-129.
18. Hoek, E., Brown, E.T., 1980, Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
19. Iwaki, K., Hiram, A., Mitani, K., Kaise, S., Nakagawa, 2001, A quality control method for shotcrete strength by pneumatic pin penetration test, NDT & E International, 34, 395-402.
20. Malmberg, Bo, 1993, Shotcrete for Rock Support: a Summary Report on the State of the Art in 15 Countries, Tunnelling and Underground Space Technology, 8.4, 441-470.
21. Oreste, P.P., 2003, A Procedure for Determining the Reaction Curve of Shotcrete Lining Considering Transient Conditions, Rock Mech. Rock Engng., 36.3, 209-236.
22. Suzuki, H., Moriyasu, H., Tazawa, Y., Hamada, T., Kadokura, S., Ono, K., 2002, Airless shotcrete system, Proc. Int. Conf. on Shotcrete for Underground Support IX, Kyoto University, 227-237.



**배규진**

1980년 국립경북대학교 농공학과 공학사  
1982년 연세대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
1990년 연세대학교 대학원 토목공학과  
공학박사

Tel: 031-910-0212  
E-mail: gjbae@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
연구부장/연구위원



**장수호**

1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2002년 서울대학교 대학원  
지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 031-910-0661  
E-mail: sooho@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
선임연구원



**이석원**

1989년 고려대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1991년 고려대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
1998년 미국 조지아공과대학 토목공학과  
공학박사

Tel: 02-2049-6043  
E-mail: swlee@konkuk.ac.kr  
현재 건국대학교 사회환경시스템공학부  
조교수



**박해군**

1991년 영남대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1996년 영남대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
2000년 일본 교토대학교 대학원  
토목공학과 공학박사

Tel: 02-2145-6040  
E-mail: hgpark68@samsung.com  
현재 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀  
과장



**이명섭**

1984년 고려대학교 공과대학 토목공학과  
공학사

Tel: 02-2145-6031  
E-mail: ms2ce@samsung.com  
현재 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀  
부장



**김재권**

2003년 연세대학교 대학원 토목공학과  
공학박사

Tel: 02-2145-5088  
E-mail: jkviva@yahoo.co.kr  
현재 삼성물산(주) 건설부문  
토목기술팀장/상무